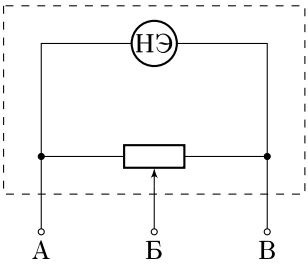
Серый ящик

Задача 2. [ВсОШ 2025/26, региональный этап, 9 класс, задача 2 (практический тур)] «Серый ящик».

Внутри серого ящика расположены потенциометр и неизвестный элемент, соединённые так, как показано на рисунке. Ручка потенциометра и провода «А», «Б» и «В» выведены наружу серого ящика.



1. С помощью выданного оборудования определите номинальное (полное) сопротивление потенциометра. При решении этого пункта построение графиков не требуется. Подробно опишите способ определения полного сопротивления.
2. Измерьте вольт-амперную характеристику неизвестного элемента, подключив «+» источника к выводу «А». Измерения необходимо провести в максимально широком диапазоне напряжений. Получите не менее 15 точек, равномерно распределённых по оси напряжения.
3. Постройте график полученной вами вольт-амперной характеристики.

Оборудование: серый ящик; соединительные провода; мультиметр (в режиме вольтметра и омметра) с щупами; держатель для батареек; две батарейки типа АА; масштабно-координатная бумага для построения графика.

Комплект для измерений не разбирать! Во избежание разряда батарейки не держите цепь замкнутой, когда не производите измерений! Режимом амперметра пользоваться запрещено! Для мультимет-

ра примите погрешность прямого измерения равной 3 единицам последнего разряда, но не менее 1% *от измеряемой величины.*

▲ **Решение. Что происходит.** Экспериментальная задача на постоянный ток. Амперметра нет, поэтому ток через неизвестный элемент (НЭ) измеряем вольтметром по напряжению на известном сопротивлении — части потенциометра, включённой последовательно с НЭ. А полное сопротивление потенциометра находим омметром, хотя концы его недоступны по отдельности: замыкаем А и В и ищем максимум показаний.

Обозначения (рис. 2). R_0 — полное сопротивление потенциометра; R_x — сопротивление его части между ползунком (Б) и выводом В, тогда между А и Б — $R_0 - R_x$. $U_{НЭ}$, $I_{НЭ}$ — напряжение и ток неизвестного элемента.

Пункт 1.

1. Схема. Соединяем проводом выводы А и В, омметр — между Б и соединёнными А, В (рис. 2). НЭ при этом замкнут накоротко (оба его конца — в одной точке) и не мешает. Омметр видит две части потенциометра параллельно:

$$\frac{1}{R_\Omega} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_0 - R_x} \quad \Rightarrow \quad R_\Omega = \frac{R_x(R_0 - R_x)}{R_0} = R_x - \frac{R_x^2}{R_0}.$$

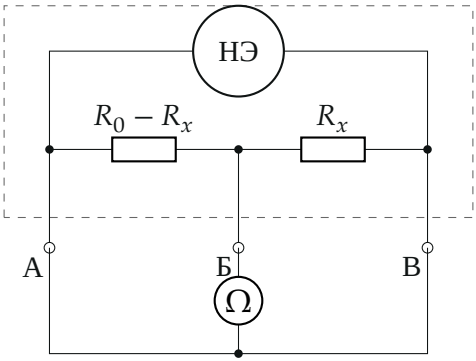


Рис. 2. Пункт 1: А и В соединены, омметр между Б и А = В. Части потенциометра $R_0 - R_x$ и R_x — параллельно; НЭ закорочен.

2. Максимум. $R_\Omega(R_x)$ — парабола ветвями вниз, вершина при $R_x = R_0/2$ (рис. 3):

$$R_{\max} = \frac{R_0}{2} - \frac{R_0}{4} = \frac{R_0}{4}.$$

Вращаем ручку и находим наибольшее показание: $R_{\max} = (27{,}2 \pm 0{,}3)$ Ом. Тогда

$$R_0 = 4R_{\max} = (108{,}8 \pm 1{,}2)\ \text{Ом}.$$

Погрешность: $\Delta R_{\max} = 1\%$ от 27,2 Ом (это больше трёх единиц разряда 0,1 Ом) $= 0{,}3$ Ом, $\Delta R_0 = 4\Delta R_{\max}$. Вблизи вершины парабола плоская, поэтому неточная установка ползунка почти не влияет на показание — метод устойчив.

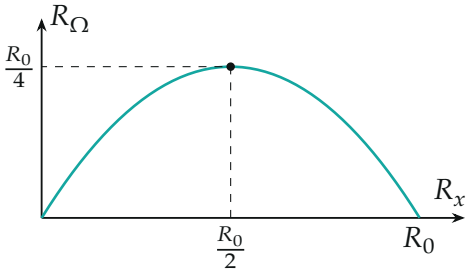


Рис. 3. Показание омметра при повороте ручки: максимум $R_0/4$ — ползунок посередине.

Пункт 2.

1. Схема для ВАХ (рис. 4). Батарейка: «+» к А, «−» к Б. Ток из А идёт двумя путями: через $R_0 - R_x$ прямо в Б и через НЭ в В, а оттуда через R_x в Б. Значит, НЭ и R_x соединены последовательно, по ним идёт один ток:

$$U_{\text{НЭ}} = U_{\text{АВ}}, \qquad I_{\text{НЭ}} = \frac{U_x}{R_x}, \quad U_x = U_{\text{БВ}}.$$

Оба напряжения меряем вольтметром (А–В и Б–В). Вольтметр с огромным сопротивлением ток в цепи не меняет.

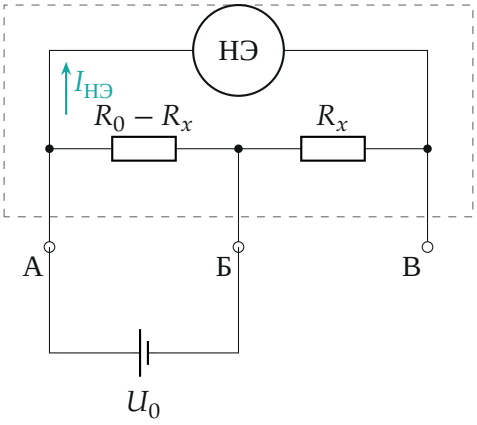


Рис. 4. Пункт 2: батарейка между А и Б. НЭ и часть R_x включены последовательно: ток НЭ $= U_{БВ}/R_x$, напряжение НЭ $= U_{АВ}$.

2. Как узнать R_x при каждом положении ручки (рис. 5). Не трогая ручку, подключаем батарейку к А и В. Теперь весь потенциометр R_0 — делитель напряжения (НЭ подключён параллельно всему потенциометру и деление не портит):

$$\frac{U'_{БВ}}{U'_{АВ}} = \frac{R_x}{R_0} \quad \Rightarrow \quad R_x = \frac{U'_{БВ}}{U'_{АВ}} R_0, \qquad I_{НЭ} = \frac{U_x\, U'_{АВ}}{U'_{БВ}\, R_0}.$$

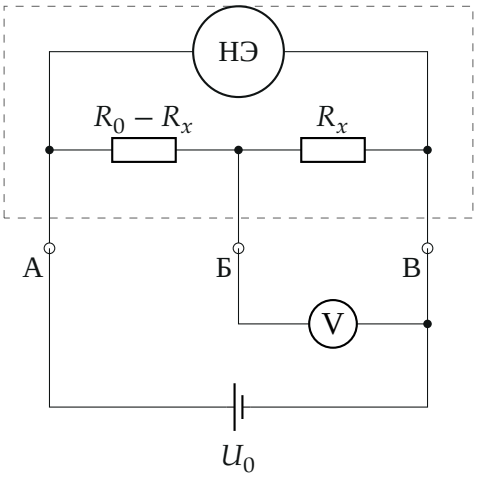


Рис. 5. Калибровка R_x: батарейка между А и В, вольтметр между Б и В, затем между А и В.

3. Порядок опыта. Ставим ручку, меряем в схеме рис. 4 $U_{НЭ}$ и U_x, переключаем батарейку (рис. 5) и меряем $U'_{АВ}$, $U'_{БВ}$. Поворачиваем ручку — следующая точка. От крайнего положения до другого напряжение на НЭ меняется от $\approx 0{,}1$ до $\approx 1{,}8$ В — это и есть доступный диапазон (две батарейки, $\approx 2{,}6$ В: $U_{НЭ}+U_x \approx 2{,}62$ В в каждой строке — полезная самопроверка). Результаты (авторская установка, $R_0 = 108{,}8$ Ом):

$U_{НЭ}$, В	1,81	1,69	1,55	1,46	1,37	1,24	1,16	1,05	0,95
U_x, В	0,83	0,94	1,07	1,16	1,25	1,38	1,47	1,57	1,68
$U'_{АВ}$, В	2,66	2,65	2,64	2,64	2,63	2,62	2,62	2,62	2,62
$U'_{БВ}$, В	0,23	0,26	0,31	0,35	0,39	0,46	0,50	0,58	0,66
$I_{НЭ}$, мА	90	88	84	80	78	72	70	65	62

$U_{НЭ}$, В	0,84	0,75	0,64	0,55	0,44	0,36	0,28	0,20	0,11
U_x, В	1,79	1,87	1,99	2,10	2,18	2,26	2,34	2,42	2,50
$U'_{АВ}$, В	2,62	2,62	2,61	2,60	2,60	2,60	2,60	2,56	2,55
$U'_{БВ}$, В	0,74	0,83	0,94	1,03	1,19	1,38	1,70	2,00	2,52
$I_{НЭ}$, мА	58	54	51	49	44	39	33	28	23

4. Погрешность тока. $I_{НЭ}$ — произведение и частное четырёх величин, относительные погрешности складываются: по 1% на U_x, $U'_{АВ}$, $U'_{БВ}$ и 1,1% на R_0, всего $\varepsilon_I \approx 4\%$, то есть $\Delta I_{НЭ}$ от 1 мА (малые токи) до 4 мА (большие).

Пункт 3. Строим $I_{НЭ}(U_{НЭ})$ (рис. 6). Характеристика нелинейная: ток растёт медленнее напряжения. Сопротивление U/I растёт от ≈ 5 Ом при 0,1 В до ≈ 20 Ом при 1,8 В — так ведёт себя нить лампы накаливания, которая нагревается током.

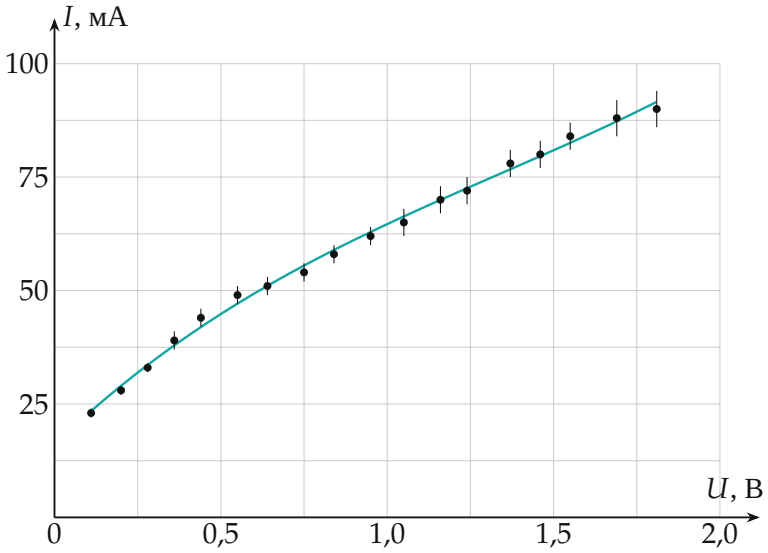


Рис. 6. ВАХ неизвестного элемента: точки с отрезками погрешности $\pm\Delta I_{НЭ}$, кривая — сглаживание по МНК многочленом третьей степени. Кривая выпукла вверх — сопротивление растёт с напряжением.

Обратите внимание. R_x нужно мерить при *каждом* положении ручки: потенциометр не проградуирован, и одно напряжение U_x без R_x тока не даёт. И напряжение на НЭ в схеме рис. 4 нельзя довести до нуля: даже при $R_x = R_0$ на НЭ остаётся $\approx 0{,}1$ В — нижняя точка ВАХ.

Проверка. Размерность $I = \dfrac{U_x U'_{АВ}}{U'_{БВ} R_0}$ — В/Ом = А. Пересчёт таблицы на python по этой формуле даёт те же токи с точностью до 2 мА (первая строка 88 против 90 мА — в пределах ± 4 мА). Сумма $U_{НЭ} + U_x$ во всех строках $2{,}62 \pm 0{,}03$ В — ЭДС батареек, как и должно быть по второму правилу Кирхгофа для контура «батарейка — НЭ — R_x».

Ответ. 1) $R_0 = 4R_{max} = (108{,}8 \pm 1{,}2)$ Ом; 2) ток НЭ $I_{НЭ} = \dfrac{U_x U'_{АВ}}{U'_{БВ} R_0}$, 18 точек от 0,11 В (23 мА) до 1,81 В (90 мА), см. таблицу; 3) ВАХ нелинейная, выпуклая вверх (рис. 6).